



УДК 539.3

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗЛОМОВ СТЕКЛЯННЫХ СТЕРЖНЕЙ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ<sup>8)</sup>

\*М.М. Давыдова, \*Е.А. Ляпунова, \*С.В. Уваров,  
\*О.Б. Наймарк, \*\*Д.А. Нечаенко

\*Институт механики сплошных сред УрО РАН,  
ул. акад. Королёва, 1, Пермь, 613001, Россия, e-mail:  
[davydova@icmm.ru](mailto:davydova@icmm.ru), [lyapunova@icmm.ru](mailto:lyapunova@icmm.ru), [usv@icmm.ru](mailto:usv@icmm.ru)

\*\*НОиИЦ «Наноструктурные материалы и нанотехнологии»,  
ул. Королева, 2а, Белгород, 308034, Россия, e-mail: [nechaenko@bsu.edu.ru](mailto:nechaenko@bsu.edu.ru)

**Аннотация.** В работе приведены результаты исследования фрактографии поверхностей разрушения кварцевого стекла, образовавшихся при ударно-волновом нагружении. Качественно показано, что увеличение энергии ударника приводит к возрастанию объема микронесплошностей («микропористости»).

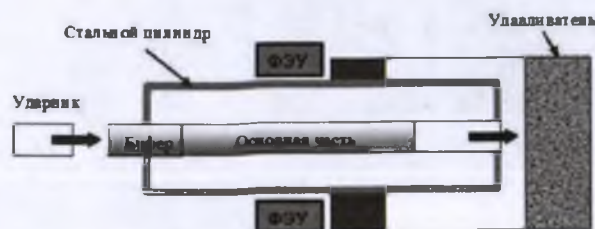
**Ключевые слова:** фрагментация хрупких материалов, фрактография поверхностей разрушения, порозиметрия.

**1. Введение.** Фрагментация – процесс разделения материи на части, широко распространенный в природе (фрагментация арктических ледяных полей), технологических процессах (дробление руды), а также при разрушении материала в результате воздействия ударных нагрузок. Хотим ли мы добиться наибольшего эффекта при измельчении, или, наоборот, избежать разрушения, нам необходимо исследовать физические механизмы фрагментации, которые представляют собой взаимодействие процессов зарождения, роста и ветвления трещин. Основным методом исследования статистических закономерностей фрагментации является определение кумулятивного распределения фрагментов по размерам. Обобщая экспериментальные результаты, можно выделить две группы, в зависимости от типа распределения. Первая характеризуется функцией распределения, в выражение которой входит экспонента; вторая – функцией распределения, описываемой с помощью степенной зависимости. В работе [1] высказывается предположение, что для пластичных материалов закон распределения экспоненциальный, а для хрупких – степенной, причем тип распределения определяется особенностями физических механизмов разрушения. Поэтому в настоящей работе акцент был сделан на исследовании микрорельефа поверхностей изломов с целью установления характерных особенностей их формирования.

<sup>8)</sup>Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» грант 14.A18.21.0243 и Российского фонда фундаментальных исследований, гранты 11-01-96010-р\_ урал\_ а, 11-01-00712-а



**2. Эксперимент.** Фрагментация цилиндрических образцов из кварцевого стекла осуществлялась на баллистической установке по схеме метода разрезного стержня Гопкинсона-Кольского. На первом этапе эксперимента стояла задача оценить влияние условий нагружения, формы и размеров образцов на вид функции распределения фрагментов по размерам. На баллистической установке были реализованы три типа нагружения: 1) фрагментация в результате взаимодействия прямой и отраженной волн сжатия; 2) фрагментация при прохождении только волны сжатия; 3) фрагментация, вызванная прохождением прямой волны сжатия и последующей реверберацией этой волны в стержне. Распределение фрагментов по размерам при фрагментации в условиях всех типов нагружения описывается степенным законом [2]. Фрактографические исследования поверхностей разрушения проводились для образцов, разрушенных по третьей схеме нагружения (рис. 1).



Диаметр образца  $D=12$  мм, длина основной части  $L_{осн}=120$  мм, длина буфера  $L_{буф}=25$  мм; ФЭУ фотозлектронный умножитель.

Рис. 1. Схема эксперимента.

Варьирование скорости ударника позволило получить картину фрагментации стеклянных стержней для различных значений энергии ударника в интервале от 2.3 до 17.7  $\text{кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}^2$  (рис. 2); общий вид сохранных после нагружения образцов представлен на рис. 3.

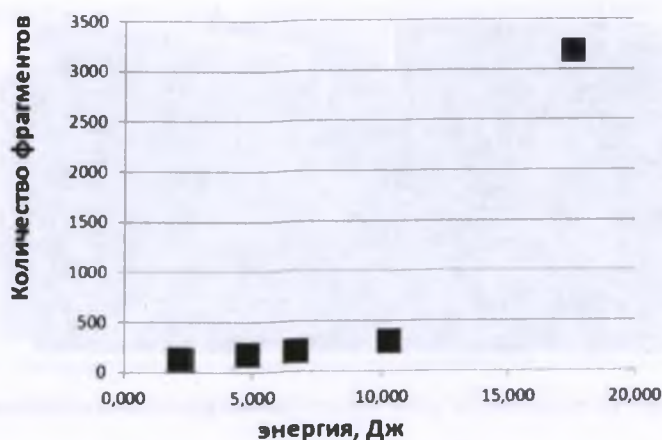


Рис. 2. Зависимость количества фрагментов от энергии ударника.



Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при малой энергии удара формируются одиночные поверхности скола, расположенные на достаточно большом расстоянии друг от друга. Увеличение энергии удара приводит к возникновению вблизи начальных очагов разрушения вторичных трещин и поверхностей скола, тем более многочисленных, чем выше энергия разрушения (рис. 3).



Рис. 3. Картины фрагментации стержней из кварцевого стекла.

Аналогичный сценарий фрагментации наблюдался в экспериментах по квазистатическому нагружению квадратных стеклянных пластин [3, 4]. Одной из возможных причин подобного характера фрагментации является неустойчивость процесса распространения трещин в хрупком теле [5–7]. Такая неустойчивость приводит к возникновению шероховатости на поверхности излома [2, 5] и оказывает существенное влияние на статистику распределения фрагментов по размерам [8, 9]. Для установления характерных элементов микрорельефа поверхностей разрушения различные фрагменты сохраненных образцов исследовались с помощью сканирующего электронного микроскопа Quanda 600, цифрового оптического микроскопа Hirox и порозиметра AutoPore IV 9500.

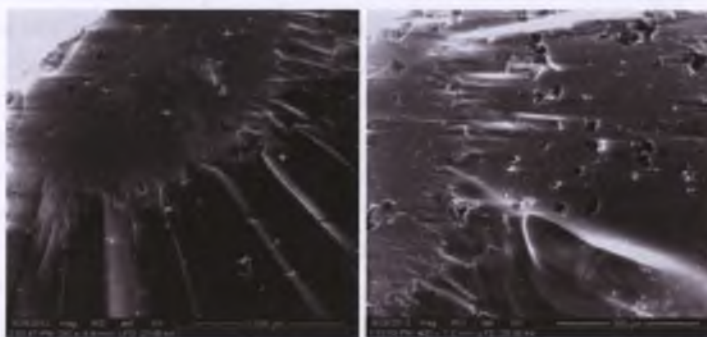


Рис. 4. Распространение разрушения от края торцевой поверхности стеклянного образца.

Инициирование разрушения чаще всего происходит у края стержней (рис. 4) и носит четко выраженную стадийность. Подобный характер разрушения наблюдался в [10] в



экспериментах по ударно-волновому нагружению флоат-стекла. На поверхностях разрушения различных образцов было обнаружено два типа элементов микрорельефа: наряду с микроступеньками, образующимся при слиянии близкорасположенных микро-трещин скола, имеются т.н. «микропоры» – почти сферические углубления, появление которых может быть вызвано действием локальных нормальных напряжений. Несмотря на некоторую условность оценок, можно проследить, как меняются структурные элементы поверхностей разрушения образцов, соответствующих различным энергиям удара: на рис. 5, а-в представлена картина изменения системы «микропор» с ростом энергии удара, на рис. 6 – соответствующая картина для системы микроступенек.

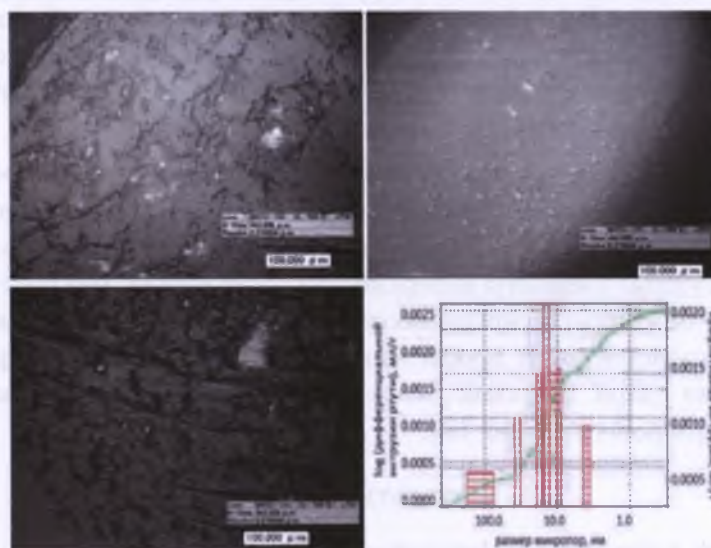


Рис. 5. Системы «микропор» на поверхностях излома образцов, разрушенных при различных энергиях удара: а) 2.3, б) 10.3 и в) 17.7 кг·м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>; г) типичная гистограмма распределения «микропор» по размерам для поверхности разрушения, соответствующей максимальной энергии ударника.



Рис. 6. Микроступеньки на поверхности разрушения сколом для образцов, разрушенных при энергии удара: а) 6.67, б) 17.7 кг·м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>.

Для количественной оценки «микропористости» поверхностей разрушения были проведены исследования фрагментов стрежней, разрушенных при различных энергиях



ударника, с помощью порозиметра AutoPore IV 9500. Настоящий цикл работ проводился в Центре нанотехнологий и наноматериалов НИУ БелГУ, г. Белгород. Для анализа использовались единичные фрагменты разрушенных образцов.

Было установлено, что достигаемая в интервале энергий удара от 2 до 7 Дж «микропористость» поверхностей разрушения отдельных фрагментов образцов является недостаточной для получения достоверных результатов методами порозиметрии, т.к. суммарный объем «микропор» меньше погрешности прибора. В случае максимальной реализованной энергии удара (17.7 Дж) «микропористость» образовавшихся поверхностей разрушения превышает погрешность прибора, что позволило построить гистограмму распределения микронесплошностей по размерам (рис. 5г). Размер микронесплошностей, соответствующих максимуму плотности распределения варьируется от 20 до 40 нм. Однако для достижения большей достоверности необходимо изменить методику измерения, в частности, анализировать общую «пористость» многих фрагментов. Проведение такого анализа является предметом дальнейших исследований.

**3. Заключение.** Исследованы закономерности формирования микрорельефа поверхностей разрушения стеклянных стержней, соответствующих энергиям удара от 2 до 17.7 Дж. Методами оптической и сканирующей электронной микроскопии установлены основные структурные элементы поверхностей разрушения: микроступеньки, обусловленные слиянием близкорасположенных микротрещин скола, и «микропоры». На основе измерения микропористости прослежена эволюция поверхностей разрушения в зависимости от энергии удара. Показано, что увеличение энергии ударника приводит к возрастанию объема микронесплошностей.

### Литература

1. Grady D.E. Length scales and size distributions in dynamic fragmentation // *International Journal of Fracture*. – 2010. – 153. – 1-2. – P.85-99.
2. Davydova M.M., Naimark O.B., Leontiev V.A., Uvarov S.V. Scaling properties of crack branching and brittle fragmentation // *European Physical Journal Web of Conferences*. – 2010. – 10. – -00037p.1-00037p.4 – URL <http://www.epj.org> – DOI: 10.1051/epjconf/20101000037.
3. Давыдова М.М., Давыдов Д.М. Экспериментальное исследование статистических закономерностей фрагментации стекла // *Материаловедение*. – 2007. – №4. – С.14-19.
4. Давыдова М.М. Экспериментальное исследование статистических закономерностей фрагментации стекла. // *Физическая мезомеханика*. – 2008. – 11. – 5. – С.77-83.
5. Fineberg J., Marder M. Instability in dynamic fracture // *Physics Reports*. – 1999. – 313. – P.1-108.
6. Наймарк О., Давыдова М., Плехов О., Уваров С. Экспериментальное и теоретическое исследование динамической стохастичности и скейлинга при распространении трещины // *Физическая мезомеханика*. – 1999. – 2;3. – С.47-58.
7. Naimark O.B., Uvarov S.V. Nonlinear crack dynamics and scaling aspects of fracture (experimental and theoretical study) // *International Journal of Fracture*. – 2004. – 128. – P.285-292.
8. Kekalainen P., Astrom J. A., Timonen J. Solution for the fragment-size distribution in a crack-branching model of fragmentation // *Physical Review E*. – 2007. – 76. – P.2-7.
9. Astrom J.A., Timonen J. Fragmentation by crack branching // *Physical Review Letters*. – 78;19. – P.3677-3680.
10. Nyoungue A., Azari Z., Abbadi M., Dominiak S., Hanim S. Glass damage by impact spallaion // *Material science and engineering*. – 2005. – 407. – P.256-264.



# REGULARITIES OF GLASS ROD FRACTURE SURFACE FORMATION INDUCED BY DYNAMIC FRAGMENTATION

\*M.M. Davydova, \*E.A. Lyapunova, \*S.V. Uvarov,  
\*O.B. Naimark, \*\*D.A. Nechaenko

\*Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Department of Russian Academy of Sciences,  
Akad.Koroleva St., 1, Perm, 613001, Russia, e-mail: [ilia.tregybov@mail.ru](mailto:ilia.tregybov@mail.ru)

\*\*Centre of nanostructural materials and nanotechnologies,  
Koroleva St., 2a, Belgorod, 308034, Russia,  
e-mail: [SmolaykovaMarina@mail.ru](mailto:SmolaykovaMarina@mail.ru), [klimenko@bsu.edu.ru](mailto:klimenko@bsu.edu.ru), [manohin@bsu.edu.ru](mailto:manohin@bsu.edu.ru)

**Abstract.** Results of fractography analysis of glass rod fracture surfaces induced by shock-wave loading are presented. It was shown qualitatively that the volume of microporosity increases with projectile energy.

**Key words:** fragmentation of brittle materials, microrelief of fracture surfaces, measurement of microporosity.